

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

## EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF FRACTAL ANALYSIS METHODS IN ENVIRONMENTAL STUDIES

**K. Shakhovskaya  
N. Lagutina  
D. Martynov  
E. Sudarikova  
A. Novichenko  
A. Yevgrafov  
A. Brovkin**

*Summary.* The article examines the possibilities of using fractal geometry methods in assessing the development of multicellular and unicellular plants. In this regard, the possibility of using fractal analysis methods in assessing the growth and development of multicellular herbaceous plants of oats and watercress grown on model soil, on slightly polluted soils of the Losiny Ostrov National Park and on technogenically polluted soils located near highways on the territory of Ryazan Avenue and Festival Street in Moscow has been studied. Also, the possibility of using fractal analysis methods in assessing the growth and development of unicellular microalgae of the *Chlorella vulgaris* BIN strain, under changing conditions of the artificial environment, has been studied. The experimental study was conducted for three years, in 2020–2022, the processing of the experimental data obtained was carried out in the “Gwyddion” program.

*Keywords:* fractal geometry, oats, watercress, microalgae, plant development, growth dynamics, technogenic pollution.

**Шаховская Кира Дмитриевна**

Магистр

РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

sh.kira2014@yandex.ru

**Лагутина Наталия Владимировна**

Доцент

РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

lagnv@rambler.ru

**Мартынов Дмитрий Юрьевич**

Доцент

РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

dtrwmc@rgau-msha.ru

**Сударикова Елена Валерьевна**

Ведущий научный сотрудник

РЭУ имени Г.В. Плеханова

sударикова.ev@rea.ru

**Новиченко Антон Игоревич**

Доцент

РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

novichenko@rgau-msha.ru

**Евграфов Алексей Викторович**

Доцент

РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

evgrafov-aleksey@mail.ru

**Бровкин Алексей Геннадьевич**

Аспирант

РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

cool1602@yandex.ru

*Аннотация.* В статье изучены возможности применения методов фрактальной геометрии при оценке развития многоклеточных и одноклеточных растений. В этой связи изучена возможность применения фрактальных методов анализа при оценке роста и развития многоклеточных травянистых растений овса и кресс-салата, выращенных на, модельном грунте, на слабо-загрязненных почвах Национального парка «Лосиный остров» и на техногенно-загрязненных почвах расположенных возле автомобильных дорог на территории Рязанского проспекта и Фестивальной улицы города Москвы. Также, изучена возможность применения фрактальных методов анализа при оценке роста и развития одноклеточных микроводорослей штамма *Chlorella vulgaris* BIN, в изменяющихся условиях искусственной среды. Экспериментальное исследование проведено в течении трех лет, в 2020–2022 годах, обработка полученных экспериментальных данных проводилась в программе “Gwyddion”.

*Ключевые слова:* фрактальная геометрия, овес, кресс-салат, микроводоросли, развитие растений, динамика роста, техногенное загрязнение.

**Ц**елью настоящего исследования является сопоставление эффективности использования фрактальных методов наряду с традиционными при исследовании влияния многофакторных экологических условий окружающей среды на рост и развитие одноклеточных и многоклеточных растений.

Одним из методов, позволяющим оценивать развитость структуры объекта в изменяющихся условиях среды существования является фрактальная геометрия [1–4]. В аспекте оценки фракталы оказались чрезвычайно удобным математическим инструментом описания динамики развития природного объекта в изменяющихся условиях среды, в которых природный объект сохраняет свое самоподобие, т.е. ведет себя как одно целое [3, 4].

Было проведено изучение роста и развития из семян травянистых растений, овса и кресс-салата, на почвах Национального парка «Лосиный остров» города Москвы и на техногенно-загрязненных почвах, расположенных возле автомобильных дорог на территории Рязанского проспекта и Фестивальной улицы города Москвы. Техногенное загрязнение почв города Москвы в том числе определяется значительной концентрацией нефтепродуктов, содержащихся в пробах, отобранных на территории Рязанского проспекта (2300 мг/кг ± 810 мг/кг) и Фестивальной улицы (3000 мг/кг ± 1000 мг/кг) по результатам химического анализа аккредитованной лаборатории ООО «МГУ-ЛАБ», что согласно показателям уровня загрязнения земель, химическими веществами является средним и высоким уровнем загрязнения почвы нефтепродуктами [5]. Превышений концентрации нефтепродуктов в пробах почвы, отобранных на территории Национального парка «Лосиный остров» лаборатория ООО «МГУЛАБ» не выявила со следующим выводом — По исследованным показателям проба соответствует установленным в нормативном документе требованиям к безопасности почв разного характера землепользования и может использоваться по назначению без ограничений. На стадии прорастания семян и развития растений при естественном солнечном освещении, осуществлялся их полив в 7 и 19 часов каждый день. Весь процесс развития высших растений в каждом варианте ежедневно фотографировался полученные данные вносились в программу «Gwyddion». В каждом варианте общее число фотографий составило 100 снимков, а всего было проанализировано 1000 снимков (рисунок 1).

В рамках нашего эксперимента динамика роста природного объекта, отображаемая фрактальной размерностью, закономерно изменялась в пределах избыточности и дефицита факторов развития.

Методика расчета и обработки полученных статистических данных. Динамика развития растения будет отличаться значениями фрактальной размерности  $D \in (1; 2)$ , которые для удобства можно нормировать к показателю Херста  $H = 2 - D$ , отражающему динамику системного метаболизма [1, 4]. В основе метода расчета фрактальной размерности, используемого в программе «Gwyddion», лежит следующий алгоритм: квадратная решетка с постоянной ( $\delta$ ) накладывается на поверхность изображения. Изначально ( $\delta$ ) задается равной  $X/2$  (где  $X$  это длина края поверхности). Тогда  $N(\delta)$  — это число всех квадратов, содержащих хотя бы один пиксель изображения. Постоянная решетки ( $\delta$ ) на каждом шаге уменьшается в два раза, и процесс повторяется до тех пор, пока ( $\epsilon$ ) не станет равной расстоянию между двумя соседними пикселями. Наклон аппроксимирующей прямой, рисунок 2, выделяющий область скейлинга (масштабной инвариантности) позволяет определить фрактальную размерность  $D$  [1–4].

Применительно к изображениям этот метод основан на подсчете квадратов, покрывающих объект на изображении:

$$\text{Log}N(\delta) = -D\text{Log}(\delta) \quad (1)$$

где:  $D$  — фрактальная размерность;  $N(\delta)$  — число квадратов, покрывающих изображение; ( $\delta$ ) — варьируемый масштаб решетки покрытия. Очевидно, что аппроксимация полученной статистики фрактальных размерностей дает тренд смещения развития овса от экологического оптимума, вызванного нарушением процессов техно-природного обмена, которое тем больше, чем выше загрязнение почвы. При этом корреляция факторов, определяющая адаптацию овса, задается соотношением:

$$C_H = 2^{H-1} - 1 \quad (2)$$

Корреляция факторов (2) происходит в пределах устойчивости развития проростков овса, которая нарушается в точках  $H_k=0,7$ ;  $H_d=0,3$  когда они переходят в неустойчивое равновесие со средой, а их рост сменяется деградацией [4].

Для нашего случая уравнение самоорганизации (адаптации) овса, определяемое корреляцией процессов действующих факторов (2) задается уравнением аппроксимирующего тренда,

$$H(t) = \alpha t - \beta \quad (3)$$

Где  $\alpha$ ;  $\beta$  — весовые коэффициенты действующих факторов (техногенных и биотических), как это представлено на Рисунке 3.

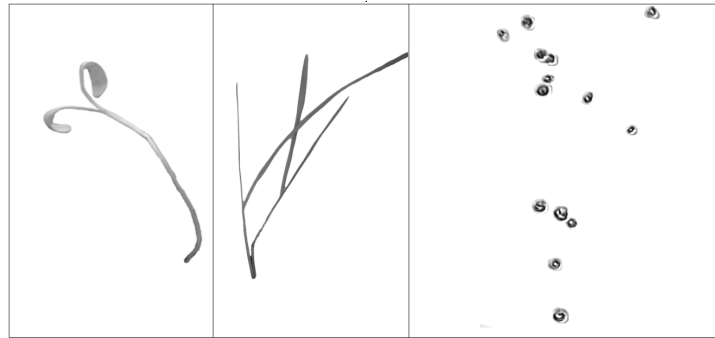


Рис. 1. Обработанные фото для вычисления фрактальной размерности в программе «Gwyddion»

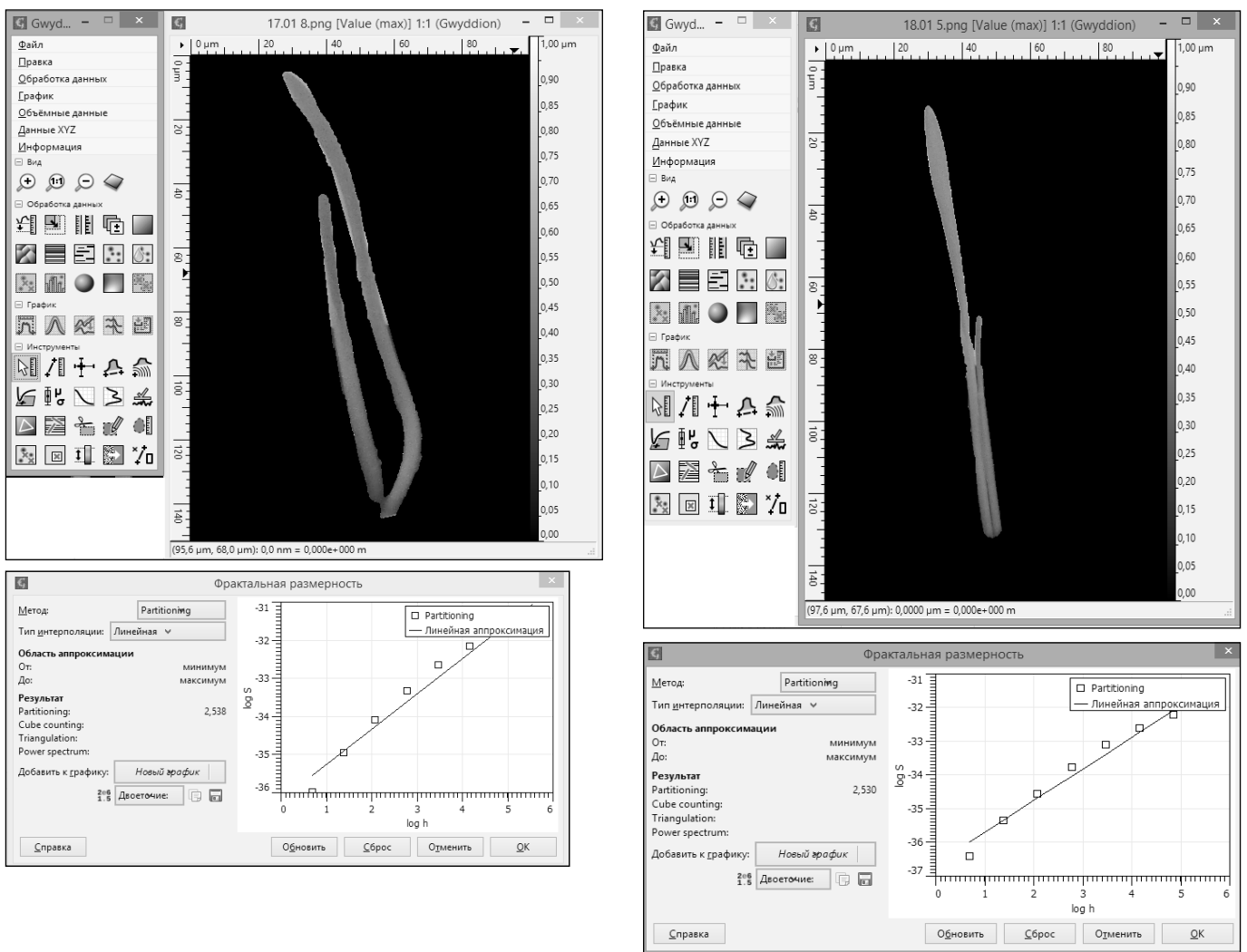


Рис. 2. Оценка фрактальной размерности проростков овса в программе «Gwyddion»

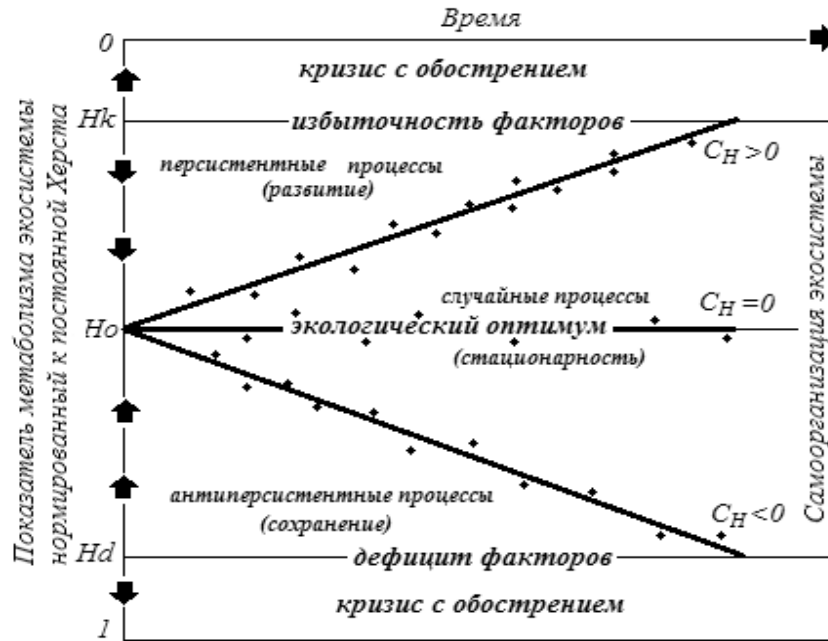
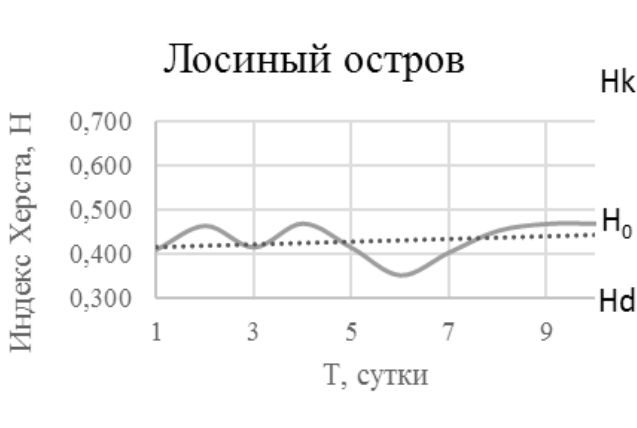
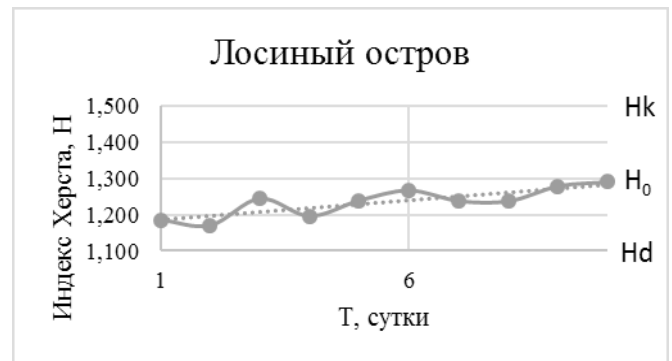


Рис. 3. Аппроксимирующие тренды метаболизма экосистемы, нормированные к постоянной Херста (H). Стрелками на оси ординат обозначена направленность техно-природных процессов.



Для пробы уравнение самоорганизации овса имеет вид:  $H(t) = 0,003t + 1,41$



Для пробы уравнение самоорганизации кресс-салата имеет вид:  $H(t) = 0,01t + 1,17$

Рис. 4. Динамика и аппроксимирующий тренд метаболизма овса и кресс-салата для почвы НП «Лосинный остров»

Обсуждение результатов расчетов

Анализ использования фрактального анализа при экологических исследованиях показал эффективность с точки зрения быстроты определения, достоверности и дешевизны использования. На основании аппроксимирующих трендов метаболизма двух

тест-объектов были сделаны выводы о самом благоприятном состоянии почв в НП «Лосинный остров», что подтверждается его статусом ООПТ и химическим анализом, приложенным к результатам исследования (рисунок 4, и неблагоприятном для растений составе почв на территории Фестивальной улицы и Рязанского проспекта, что также соответствует результатам химического анализа.

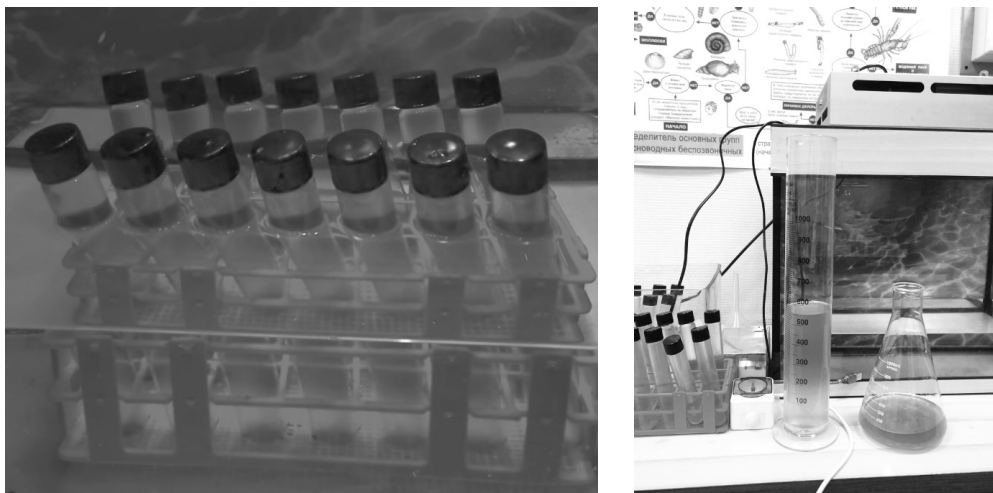


Рис. 5. Процесс работы с суспензией из хлореллы

Анализ развития суспензии хлореллы под влиянием различных внешних факторов, включая влияние температуры, освещенности и различных видов удобрений в воде, проводился с учетом ранее выполненных работ в этой сфере исследований [6–8].

Разбавление удобрений происходило следующим образом:

В подготовленную суспензию объемом 1 литр и содержанием клеток  $3105961 \pm 17895$  мл. вливали очищенную воду с известным составом: кальций 0,5–40 мг/л, магний 60–85 мг/л, натрий 0,2–200 мг/л, калий 0,1–20 мг/л, гидрокарбонаты 5–300 мг/л, хлориды 0,5–250 мг/л, сульфаты 0,5–250 мг/л, Общая жесткость < 7 мг экв/л. объемом 200 мл. на 100 мл. суспензии хлореллы. Далее раствор переливали в пробирки и помещали в подготовленную среду, добавляя в 2 выборки удобрение «Эпин Экстра», разведенный в подготовленной воде с общей жесткостью < 7 мг экв/л.

Наблюдения, систематизация и обработка результатов выполнялась в течении 7 дней. Исследования проводились в обогреваемом контейнере и при том же освещении при комнатной температуре. В оборудованном контейнере в автоматическом режиме на основе аппаратно-программного комплекса Arduino поддерживалась оптимальная для роста микроводорослей штамма *Chlorella vulgaris* BIN температура в диапазоне от 27 °C до 30°C. Фитолампа Smart Led Grow Light, мощностью 160В, в исследовании генерировала искусственное освещение (с промежутками 16 часов включенный свет и 8 часов выключенный свет), Рисунок 5.

Количество клеток было подсчитано традиционным образом на основе следующих расчетных методик:

Использовалась формула:

$$A = H \cdot M \cdot 12499 \quad (4)$$

где:  $A$  — количество клеток в 1 мл;  $H$  — число разведений суспензии перед расчётом;  $M$  — количество клеток штамма *Chlorella vulgaris* BIN полученное при подсчете в двадцати больших квадратах камеры Горяева [6, 9].

Доверительные границы  $\hat{a}$ , случайной погрешности оценки измеряемой величины при подсчете клеток в камере Горяева рассчитывались согласно ГОСТ Р 8.736–2011, для доверительной вероятности  $P=0,95$  по формуле [10]:

$$\hat{a} = t \cdot s_{\bar{x}} = t \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (14)$$

где:  $n$  — число больших Квадратов камере Горяева в которых проходил подсчет клеток, с учетом подсчета в двадцати больших квадратах камеры Горяева ( $n = 20$ );  $x_i$  — число клеток в каждом из больших квадратов камеры Горяева где  $i$  имеет значения  $i = 1, 2, 3, 4, \dots, 20$ ;  $t$  — коэффициент Стьюдента, для доверительной вероятности  $P = 0,95$  и  $n = 20$  равный 2,093;  $\bar{x}$  — среднее арифметическое значение результата измерений.

В результате анализа проб из пробирки, после учета и вычета микронных фоновых органических и неорганических загрязнений было определено общее содержание клеток штамма *Chlorella vulgaris* BIN у разбавленной суспензии, данные о количестве клеток в суспензии в конце опыта представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Расчет количества клеток штамма *Chlorella vulgaris* BIN в 1 мл.

Среднее значение с удобрением вне контейнера	Среднее значение вне контейнера и удобрений	Среднее значение в контейнере с удобрением	Среднее значение в контейнере без удобрений
3985632±22963	3069983±17687	4032662±23234	39982363±230352

Таблица 2. Расчет фрактальной размерности, D

Среднее значение с удобрением вне контейнера	Среднее значение вне контейнера и удобрений	Среднее значение в контейнере с удобрением	Среднее значение в контейнере без удобрений
1,486	1,286	1,586	1,51

В качестве экспериментальных данных брались фрактальные размерности концентрации жизнеспособных клеток хлореллы, расположенных на одном квадрате камеры Горяева.

Обоснование использования фракталов основывается на том, что это инструмент, наглядно показывающий нам воспроизводство иерархично организованной сложной системы и, тем самым, ее сохранение при вариациях внешней нагрузки. Чем выше нагрузка, тем хуже воспроизводится ресурс системы, что и демонстрирует фрактал. Когда ресурс исчерпан, система стагнирует. Данные о расчете фрактальной размерности в конце опыта представлены в таблице 2

В таблице 2 представлены средние расчеты фрактальной размерности за каждый день измерения в разных условиях.

Шкала исследования — фрактальная, индикаторная с предельно допустимой экологической нагрузкой (ПДЭН) —

- ◆ D=1,7 (стагнация) при которой ресурс полностью истощается;
- ◆ D=1,2 (сборка системы);
- ◆ D=1,5 это оптимум, относительно которого оценивается уклонение развития.

То есть можно сказать, что хлорелла жива в диапазоне  $1,2 < D < 1,7$ .

При D=1,2 она начинает формировать систему с физраствором, при D=1,7 она останавливает свое деление и умирает.

Используя фотографии хлореллы под микроскопом при разных условиях, были рассчитаны фрактальные размерности в программе Gwyddion и оценен режим развития (воспроизводство клеток) хлореллы при смене условий существования и произведено сравнение с традиционным методом подсчета клеток в камере Горяева.

В соответствии с вышеизложенным по Таблице 3 можно сделать вывод, что режим развития лучше всего выражен в условиях контейнера с применением удобрения, что подтверждается данными, полученными при подсчете клеток число больших Квадратов камере Горяева.

## ВЫВОДЫ

Были проанализированы современные методы оценки влияния экологических условий окружающей среды на одноклеточные и многоклеточные растения, приведены сведения о влиянии городских почв на прорастание растений, исследована информация о плодородии почв, экологическом значении важнейших макроэлементов и микроэлементов для растений, проведен анализ полученных данных, с применением расчетных методов фрактальной геометрии. По итогам проведенной научно-исследовательской работы можно сделать вывод, что при проведении экологических исследований и оценке воздействия внешних факторов и условий на биологические объекты, вместе с традиционными методами возможно применение методов фрактальной геометрии, обладающих большей информативностью и простотой обработки при работе с массивами данных.

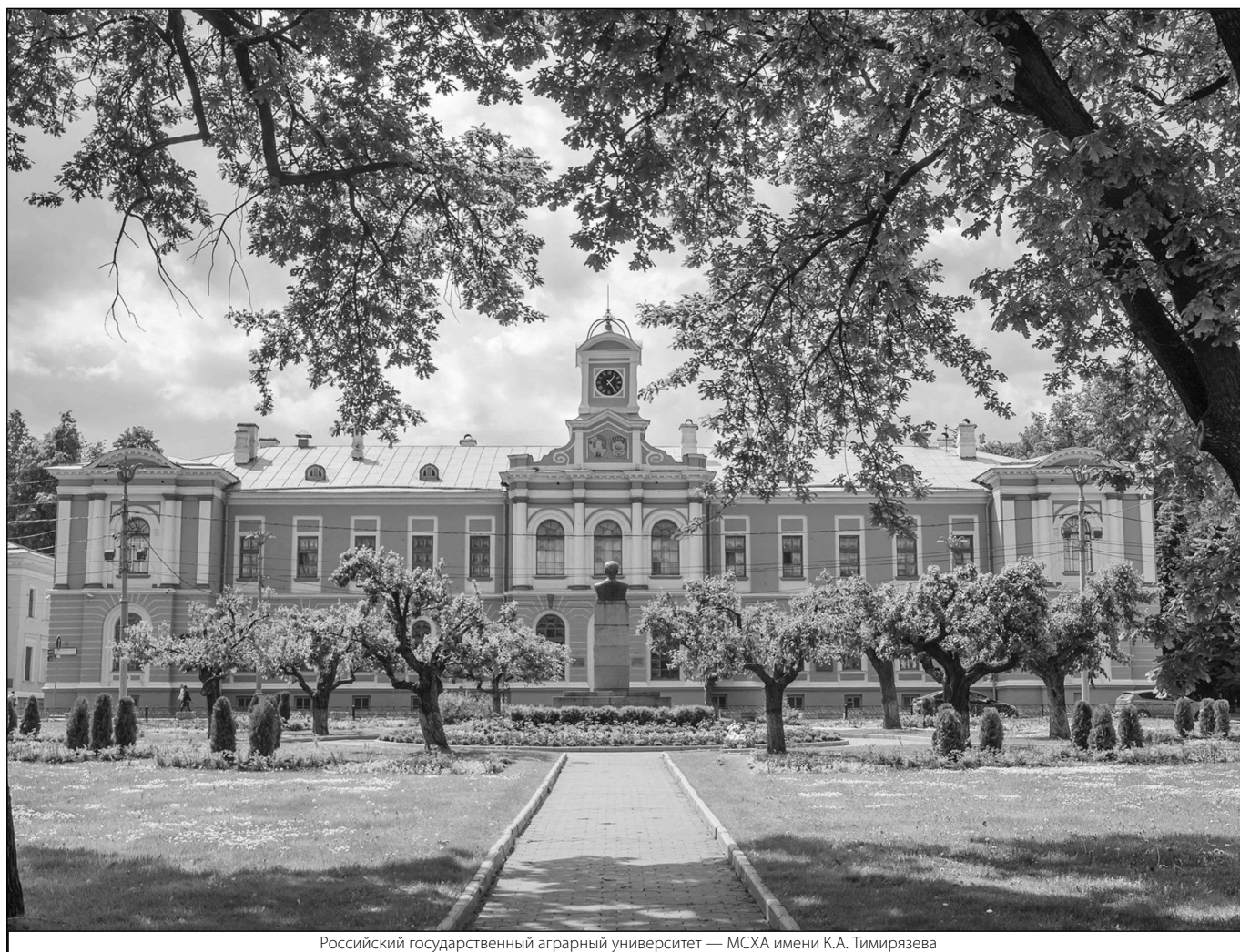
## ЛИТЕРАТУРА

1. Иудин Д.И., Копосов Е.В. Фракталы: от простого к сложному. / Н. Новгород: ННГАСУ, 2012. — 200с.
2. Молчатский С.Л., Казанцев И.В., Матвеева Т.Б. Применение метода фрактального анализа для биоиндикационной оценки состояния окружающей среды. Самара: Самарский научный вестник, 2016. № 4 (17). С. 28–31

3. Терехов С.В. Фракталы и физика подобия. / Донецк: «Цифровая типография», 2011—255 с.
4. Кульнев В.В, Насонов А.Н., Цветков И.В. применение методов мультифрактальной динамики при проведении экологического мониторинга водоемов // Глобальные экологические проблемы: локальное решение. М.: «Перо», 2019. С. 69–80
5. О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами: Письмо Минприроды России от 27.12.1993 N04–25/61–5678
6. Barsukova M.V., Martynov D. Yu., Novichenko A.I., Lagutina N.V., Evgrafov A.V. Development and symbiosis of chlorella strain in natural and extreme conditions of the aquatic environment / Nashville: Journal of Complementary Medicine Research. 2021. Т. 12. № 2. С. 14–20.
7. Мартынов Д.Ю., Новиченко А.И., Лагутина Н.В. Использование передовых аппаратных комплексов при культивировании и переработке микроводорослей / М: Сборник статей: Доклады ТСХА, 2019. — С. 409–412.
8. Lagutina N.V., Pukhovskiy A.V., Martynov D. Yu., Neupokoev L.P., Korol T.S., Barsukova M.V., Novikov A.V., Sumarukova O.V. Hydrobiological Studies of the Kosinskies Lakes. В сборнике: Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES2019). 2019. С. 609–615.
9. ОФС.1.7.2.0008.15. Определение концентрации микробных клеток.
10. ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

© Шаховская Кира Дмитриевна ( sh.kira2014@yandex.ru ), Лагутина Наталия Владимировна ( lagnv@rambler.ru ), Мартынов Дмитрий Юрьевич ( dmrwmc@rgau-msha.ru ), Сударикова Елена Валерьевна ( sudarikova.ev@rea.ru ), Новиченко Антон Игоревич ( novichenko@rgau-msha.ru ), Евграфов Алексей Викторович ( cool1602@yandex.ru ), Бровкин Алексей Геннадьевич ( cool1602@yandex.ru ).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева